Aus der Chirurgischen Universitätsklinik in Berlin
(Direktor: Prof. Dr. G. Magnus)

Entsteht beim Knochenbruch an den Bruchenden eine meßbare Temperaturerhöhung?

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung der
Medizinischen Doktorwürde
an der
Friedrich-Wilhelms-Universität zu Berlin
vorgelegt von

Eva Ulrici
aus Kiel

Tag der Promotion: 18. 3. 1938

Druck: Karl u. Richard Hoffmann, Charlottenburg, Schillerstr. 44.

M 535

Gedruckt mit Genehmigung
der
Medizinischen Fakultät der Universität Berlin
Dekan: Prof. Dr. Siebeck
Referent: Prof. Dr. Magnus.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Es mag sein, daß die Fragestellung, die dieser Abhandlung zugrunde liegt, im ersten Augenblick merkwürdig erscheint. Der Mediziner ist bekanntlich nicht sehr geneigt, sich mit physikalischen Dingen zu befassen, und wird daher zuerst eine Erklärung über Anlaß und Zweck dieser Untersuchungen erwarten.

Die im Kriege auftretenden Nekrosen nach Schußverletzungen erkannten Magnus und König als Folge der zum Teil außerordentlich erhitzten Geschoßteile. Aus Versuchen von Block geht hervor, daß besonders bei den schnell laufenden elektrischen Bohrern und Sägen eine erhebliche Erhitzung stattfindet, so daß die Regenerationsfähigkeit des Knochens zweifellos herabgesetzt ist, wenn auch tiefer greifende Veränderungen im Sinne von Brandnekrosen nicht beobachtet worden sind.

Die Ursache der an Amputationsstümpfen häufig einmal auftretenden Kronensequestern wird in der Ablösung des Periosts gesucht. König hält es aber für zweifelhaft, daß die Abstreifung des Periosts und die Markschädigung als Ursache dauernder Nekrose genügt, so daß in Erwägung gezogen werden muß, ob nicht auch hier die beim Sägen auftretende Hitze mit verantwortlich zu machen ist.

Im Verfolg dieser Ueberlegungen bedarf es nur noch eines Schrittes weiter, um sich die Frage vorzulegen, ob nicht auch beim Knochenbruch die aus mechanischer Energie entstehende Wärme einen Grad erreichen kann, der eine Schädigung im oben genannten Sinne möglich macht.

Führt die Schädigung nicht zur Nekrose, so treten doch Abbauprozesse am Knochen auf, die von verschiedenen Autoren beschrieben worden sind. Bonome fand 48 Stunden nach einer Fraktur alle dem Bruch benachbarten Knochenzellen nekrotisch, auch bei Infraktionen, bei denen schwere Gewebszertrümmerungen auszuschließen waren.

Kieling beschreibt derartige röntgenologisch nachweisbare Strukturveränderungen im Verlaufe von Frakturhei-

lungen und teilt sie in mehrere Grade ein. Während auf der einen Seite der Abbau am Knochen die Heilungsvorgänge günstig zu beeinflussen scheint, können andrerseits ausgedehnte Nekrosen sicher zur Pseudarthrose führen.

Vergegenwärtigt man sich nun, daß nach Geschoßverletzungen häufiger Pseudarthrosen beobachtet worden sind, daß bei Knochenbohrungen häufig nur fibröse Ausfüllung des Knochendefektes stattfand, und die erwartete knöcherne Heilung ausblieb, so liegt es im Zusammenhang mit dem oben Gesagten nahe, eine normalerweise beim Knochenbruch nicht auftretende Temperatursteigerung als Teilursache für eine Pseudarthrose heranzuziehen.

Daraus folgt klar die Fragestellung: „Entsteht beim Knochenbruch eine meßbare Erwärmung der Brustellen, und gibt es Fälle, die einen Ausschlag weit über das Normale ergeben, so daß eine Wärmeschädigung wahrscheinlich wird?".

Welche Temperatur ist nun überhaupt notwendig, um lebendes Gewebe zum Absterben zu bringen, oder seine Regenerationsfähigkeit zu vernichten bzw. hochgradig herabzusetzen?

In den Lehrbüchern findet man allgemein, daß bei einer Steigerung der Temperatur über 50 Grad ein Absterben der zelligen Elemente stattfindet, indem Erstarrung, Vakuolisierung, Schrumpfung und Zerfall auftreten. Aber schon bei geringeren Temperaturen lassen sich Veränderungen in der Funktion der Zelle feststellen, die wahrscheinlich auf eine Schädigung zurückzuführen sind. So scheidet z. B. Nierengewebe in einer Traubenzucker-Ringer-Lösung auf KCN-Zusatz nur bis zu einer Temperatur von 45 Grad, die Leber sogar nur bis 44 Grad Phosphat ab. Siebert prüfte den Effekt von abgestufter Wärmeeinwirkung auf Knorpel bei Transplantationen und fand den kritischen Punkt der Wärmebehandlung bei 47 Grad. Bei Erwärmung über diese Temperatur heilte das homöoplastische Transplantat nicht mehr ein. Den Einfluß der Hitze auf die Zellteilung studierten Tage, Kemp, Jens und Juul. Sie fanden ebenfalls eine irreversible Degeneration der Zelle bei länger dauernder Hitzeeinwirkung über 50 Grad. Bei einer Erhitzung auf 45—46 Grad verzögerte die Hitze

die Umwandlung des Protoplasmas vom Sol- in den Gel-Zustand, der für die Polwanderung der Chromosomen notwendig ist, und die Zellen konnten aus dem Stadium der Metaphase nicht in das der Anaphase übergehen. Bei einer Erwärmung unter 44 Grad konnten die Autoren keine charakteristischen Veränderungen feststellen.

Setzt man die Körpertemperatur im Inneren des Körpers als etwa 38 Grad, so müßte eine zusätzliche Erwärmung über 12 Grad ein Absterben der betroffenen Zellen zur Folge haben, während eine Erwärmung unter 6 Grad keine Veränderungen hervorrufen dürfte. Die zusätzliche Erwärmung zwischen 6 und 12 Grad dagegen ist geeignet, eine Herabsetzung der Funktion zu bewirken. Ob diese allein schon ausreicht, die Heilungstendenz zu vermindern, ist wohl zweifelhaft, doch wäre es denkbar, daß eine derartige Schädigung bei einem schon auf andere Weise beeinträchtigten Organismus den Ausschlag geben könnte. Dabei ist allerdings sicher zu bedenken, in welcher Ausdehnung das Gewebe geschädigt wird, d. h. es genügt nicht, eine Erwärmung der Bruchstelle um die oben genannte Temperatur festzustellen, sondern es müßte auch ermittelt werden, in welchem Bereich diese Temperaturerhöhung ihre Wirkung entfalten kann.

Außerdem betrug leider in allen angeführten Versuchen die Dauer der Erwärmung im Mindestfalle einige Minuten, während man beim Knochenbruch mit Sekunden oder sogar mit Bruchteilen von Sekunden rechnen muß.

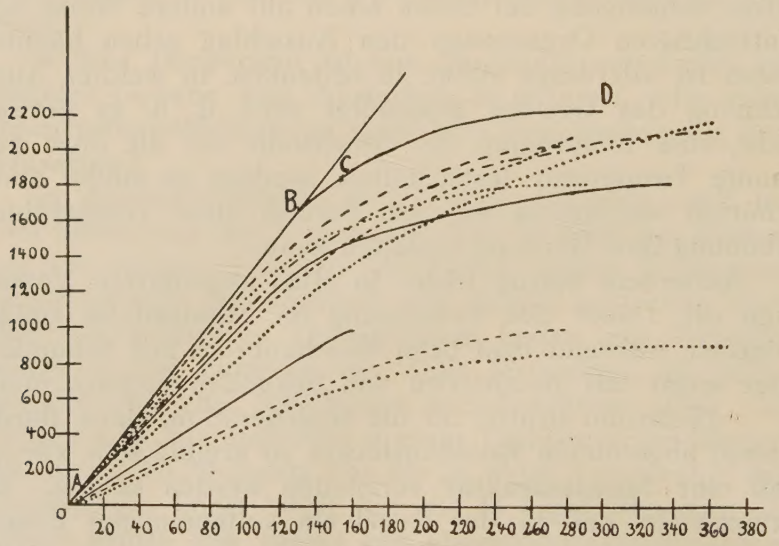
Nußbaum prüfte, ob die Regeneration eines durch Dampf abgetöteten Knochenstückes so ergibig sein würde, daß eine Spontanfraktur vermieden werden könnte. Er beobachtete, daß in der Regel ein vollkommener Ersatz der so entstandenen aseptischen Knochennekrose stattfand, jedoch zeigte sich im Tierversuch, daß die ossifizierende Kraft des Periosts nach schädigenden Einflüssen keine sehr große war, und daß das geschädigte Stück im lebenden Knochen einen Umbau durchmachte, derart, daß es nachher eine ausgeprägte spongiöse Struktur zeigte.

Wenn auch die angeführten Beobachtungen nicht überzeugend sind dafür, daß eine durch eine bestimmte höhere Temperatur hervorgerufene Wärmeschädigung zu einer

mangelhaften Heilung Veranlassung sein muß, so läßt sich doch die Ansicht vertreten, daß unter bestimmten Bedingungen und zusammen mit anderen Faktoren eine derartige Möglichkeit besteht.

Ueber die Mechanik des Knochens ist schon viel geschrieben worden. Rauber bestimmte die Elastizität und Festigkeit der Knochen. Ihm folgten Messerer und später Triepel, der die dynamische Beanspruchung ermittelte, während die vorher Genannten nur die statischen Verhältnisse berücksichtigten.

Aus der Arbeit Raubers sollen einige Daten herausgegriffen werden, da die sehr feinen Messungen eine kurvenmäßige Darstellung ermöglichen, aus der auch der für diese Arbeit wichtige Teil ersichtlich ist.



In dieser Kurve bedeutet der Punkt B. die Elastizitätsgrenze. Der Teil AB der Kurve stellt also die rein elastische, BD die teilweise unelastische Biegung dar. Der Teil CD der Kurve ist ergänzt und entspricht der Fließkurve anderer Materialien. Die Wärmebildung beginnt nach Ueberschreitung der Elastizitätsgrenze und kann aus der unelastischen Arbeit, d. h. der Differenz der Gesamtarbeit und der elastischen Arbeit berechnet werden.

Aus diesen Kurven geht schon die Schwierigkeit hervor, die auftretenden Temperaturen einigermaßen zu präzisieren. Der Knochen ist absolut kein homogenes Material, der Verlauf der Kurven wird also nicht einheitlich sein, und da die Größe der unelastischen Arbeit maßgebend ist für die Wärmebildung, werden auch die Temperaturen innerhalb ziemlich weiter Grenzen schwanken.

Dabei waren die Versuche Raubers in dieser Hinsicht noch besonders günstig, da er mit Knochenstäbchen arbeitete, die aus dem Mittelstück großer Röhrenknochen hergestellt waren und ganz bestimmte Abmessungen hatten, also ein verhältnismäßig einheitliches Material darstellten.

Es ist z. B. anzunehmen, daß ein spröder Knochen, dessen Festigkeitsgrenze unmittelbar hinter der Elastizitätsgrenze liegt, dessen unelastische Arbeit also sehr klein ist, eine wesentlich geringere Temperatur an der Bruchstelle ergibt, als ein weicher Knochen, dessen unelastischer Teil der Kurve noch durch das stärkere Fließen verlängert wird.

Die Versuchsanordnung Raubers wurde trotzdem nicht angewendet, weil mit dem auf seine Art hergestellten homogenen Material zwar besser vergleichbare Werte erreicht werden können, aber die am Lebenden herrschenden Verhältnisse stark verschoben werden.

Der Knochen ist eben, wie auch Messerer, der Raubers Versuche ablehnte, betonte, hinsichtlich der Dichtigkeit und Art des Gefüges nicht überall gleich, und das Ergebnis der Untersuchungen soll ja keine theoretische Feststellung sein, sondern dazu beitragen, die letzten Ursachen eines schweren Krankheitsbildes zu ergründen.

Trotzdem wurde der Versuch gemacht, aus den Rauberschen Daten eine Temperaturberechnung abzuleiten. Dazu diente folgende Ueberlegung:

Die Elastizitätsgrenze wird zunächst an den Grenzfasern überschritten, dann tritt dort eine unelastische Deformierung auf. Wird das Biegungsmoment noch größer, so wird die Schicht, die unelastische Deformation erleiden muß, von außen nach innen immer dicker. Daraus ergibt sich, daß die aus den Biegungskurven errechnete unelastische Arbeit zuerst aus der äußeren Schicht allein, und nach

und nach aus den inneren dazu entstanden sein muß. Betrachtet man also die Entstehung der unelastischen Arbeit, so wird ein erster kleiner Abschnitt in eine Randschicht von ganz bestimmter Breite aufgenommen. Die Breite des Abschnittes ergibt sich daraus, daß der übrige Teil sich noch rein elastisch verhalten muß, d. h. an der Grenze zwischen beiden Teilen liegt gerade die Elastizitätsgrenze. Ein zweiter kleiner Abschnitt erfaßt außer der obigen Randschicht eine darunter liegende weitere Schicht, wieder so breit, daß die Elastizitätsgrenze gerade erreicht ist, u.s.w.

Ist das Biegungsmoment über den ganzen Balken konstant, so erstrecken sich die unelastisch deformierten Randschichten in gleicher Dicke über die ganze Länge. Da das Biegungsmoment von der Einspannungsstelle bzw. von der Pendelaufschlagstelle nach den Enden zu abnimmt, so ist die unelastisch deformierte Schicht auch der Länge nach begrenzt. Die Grenze liegt dort, wo die Elastizitätsgrenze gerade eben erreicht ist. Die unelastische Arbeit verteilt sich daher sowohl auf der Druck- als auf der Zugseite auf wachsende muschelförmige Stücke.

Leider gibt es keine Theorie des unelastischen Vorgangs, die diese Grenzen zu bestimmen gestattet.

Nimmt man als Annäherung an, daß die Begrenzung dieses Muschelstückes eine Parabel ist, deren Länge bekannt ist, da an den Enden die Elastizitätsgrenzspannung herrscht, deren Höhe bei einer bestimmten Belastung als Unbekannte beibehalten wird, und berechnet die Durchbiegung nach Art der bekannten Methoden der Elastizitätstheorie, so kann man durch Vergleich mit den tatsächlich im Versuch gefundenen Durchbiegungen die unbekannte Höhe der Parabel bestimmen.

Auf Grund dieser Ueberlegungen ist es möglich, die Verlängerungen und Spannungen und damit die Energie an jeder Stelle der Muschel zu bestimmen. Da die Wärmekapazität des zugehörigen Muschelteilchens ebenfalls bekannt ist, erhält man durch Division beider die Temperatur. Der Raubersche Versuch Nr. 72 ergibt nach dieser Methode in der Mitte der Randschicht des Stäbchens 1,15 Grad.

Diese Temperatur ist zugleich der Größtwert, da die

Grenzfaser d. h. die äußerste Schicht des Knochens die höchsten Energien entwickelt, und auch die spezifische Wärme des kompakten Knochens niedriger ist als die des spongiösen.

Die Länge der Muschel im Augenblick des Bruches beträgt nach dieser Berechnung 36 % der Stäbchenlänge, die Höhe der Muschel 77 % der halben Dicke. Der Temperaturverlauf im Stäbchen ist fast dreieckig.

Wie weit läßt sich diese für die sauberen glatten Stäbchen errechnete Temperatur auf die unregelmäßig geformten ganzen Knochen übertragen?.

Auch hier gibt es keine exakte Methode. Mangels anderer Unterlagen soll folgende Ueberlegung helfen.

Unter Voraussetzung gleicher Eigenschaften der Substanz ist die Temperatur abhängig von dem Verhältnis der Energie zum Volumen. Dieser Wert ist für die elastischen Biegungen der verschiedensten Querschnitte wie Rechteck, Ellipse, Kreis, Dreieck und Kreisring bekannt. Bezogen auf das Rechteck ist der Wert des vollen Kreises, der Ellipse und des Dreiecks $^3/_4$, des Kreisringes

$$^3/_4 \cdot \left[1 + \left(\frac{\text{Innenradius}}{\text{Außenradius}} \right)^2 \right]$$

Diese Zahlen dürften, wenigstens der Größenordnung nach, auch für die unelastischen Arbeiten und damit für die Temperaturen anwendbar sein.

Interessant ist, daß bei einem Kreisring mit einem Verhältnis des Innenradius zu Außenradius von 0,58 der Wert dem Rechteck gleich ist, bei einem größeren Verhältnis diesen Wert sogar übersteigt.

Daß beim Bruch eines weichen Knochens eine höhere Temperatur wahrscheinlicher ist als bei einem spröden, da die unelastische Verbiegung bei ersterem weit größer ist als bei letzterem, wurde anläßlich der Besprechung der Rauberschen Versuche schon erwähnt. Es ist also anzunehmen, daß die Verteilung der organischen bzw. der anorganischen Substanzen im Knochen für die auftretenden Temperaturen eine Bedeutung haben können. Es wird demnach wahrscheinlich auch das Alter des Knochens eine Rolle

spielen. Nach Fremys Untersuchungen ist zwar das Verhältnis von verbrennlichen zu feuerbeständigen Anteilen im Knochen in allen Lebensaltern dasselbe; da aber die Wandstärke eines alten Knochens geringer ist als bei einem jüngeren, muß die Knochensubstanz entsprechend weniger organische Anteile enthalten, also spröder sein.

Diese Tatsache wird im lebenden Organismus keine allzugroße Bedeutung haben, da die vielleicht größere Schädigung des jugendlichen Knochens durch eine höhere Temperatur sicher durch die stärkere Regenerationsfähigkeit wieder wett gemacht wird. Es ist zu beachten, daß die größere Belastung beim Bruch mit der Temperatur nicht gleichsinnig zu verlaufen braucht, da letztere ja nur von der unelastischen Arbeit abhängig ist. Aus den Versuchen Raubers geht hervor, daß ein Knochenwürfel von 5 mm Kantenlänge eine Belastung von 426 kg trug, derselbe geglühte Knochen, also ohne organische Substanz, 149 kg, der entkalkte Knochen dagegen nur 68 kg Belastung aushielten. Leider sind in seiner Arbeit nur diese Zahlen erwähnt, während der Verlauf der Kurven, der doch für die Temperaturbestimmung wichtig wäre, nicht verzeichnet ist.

Die Versuche für diese Arbeit konnten natürlich nur an totem Material gemacht werden. Wie verhält sich nun der tote Knochen gegenüber dem lebenden?

Es ist bekannt, daß die Widerstandskraft des Knochens im toten Zustande größer ist als im lebenden. Die histologische Untersuchung des Knochens ergibt für den lebenden und toten keine Unterschiede, und auch die chemische Zusammensetzung ändert sich nicht, da der Knochen gegen Fäulnis sehr resistent ist. Nach Falk ist die Härte des Knochens nach dem Tode der Cohäsion entsprechend vermehrt.

Abey erklärt die größere Widerstandsfähigkeit des toten Knochens bzw. des Knorpels durch die Temperaturänderungen. Versuche mit lufttrockenem Knorpel zeigen, daß beim Erwärmen auf 40 Grad eine geringere Härte und ein abgeänderter Elastizitätskoeffizient resultieren. Er schließt daraus, daß bei Abkühlung der Härtegrad zunimmt.

Zuppinger dagegen stellt fest, daß die Temperaturabnahme eine Festigkeitsvermehrung nicht hervorbringt, daß

der arterielle Druck durch die Oberflächenspannung eine wenn auch untergeordnete Bedeutung besitzt, daß aber die Hauptursache der größeren Brüchigkeit im Leben in dem Muskelzug- und Druck zu suchen sei.

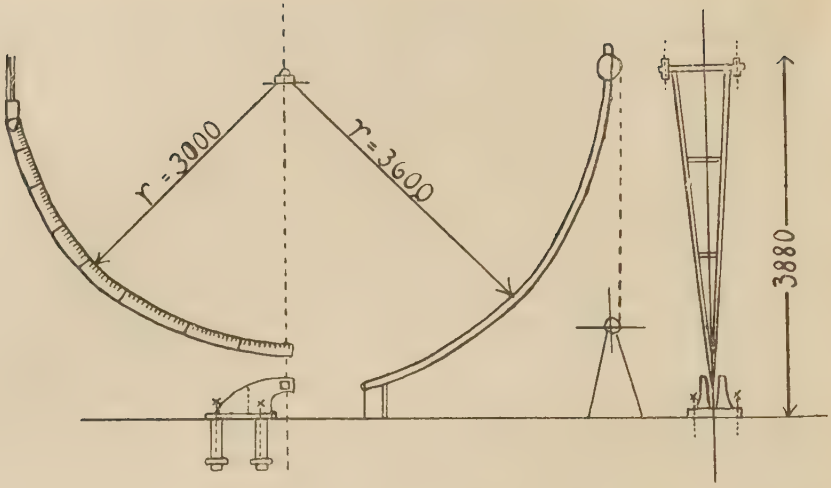
Welche Schlußfolgerungen dürfen daraus für die vorliegende Arbeit gezogen werden?

Wie schon oben erwähnt wurde, sagt die Größe der Bruchspannung nichts aus über das sonstige Verhalten des Materials. Sie gibt keinen Anhalt für die Größe der unelastischen Arbeit und somit für die Temperatur. Es ist aber anzunehmen, daß bei Austrocknung die Dehnung geringer wird, d .h. der Knochen unelastischer also spröder wird, und die gemessene Temperatur niedriger ist als beim Lebenden. Allerdings ist zu berücksichtigen, daß die geringere spezifische Wärme des trockenen, spröden Knochens zu höheren Temperaturen führen kann. Beide Einflüsse überdecken sich. Die Differenz der Temperatur im lebenden und toten Zustande läßt sich daher schwer schätzen, doch ist anzunehmen, daß sie, da die Bruchtemperatur selbst sehr niedrig ist, klein sein wird, und ihr daher keine größere Bedeutung zukommt.

Die Versuche zu dieser Arbeit wurden sämtlichst im Festigkeitslaboratorium der Technischen Hochschule zu Charlottenburg ausgeführt.

Zum Zerbrechen der Knochen wurde zuerst das Pendelschlagwerk benutzt, das auch unter dem Namen Kerbschlagapparat bekannt ist. Der Versuch geht so vor sich, daß ein unten mit einer Schneide versehenes Pendel aus einer bestimmten Höhe schwingt und bei Durchgang durch den 0-Punkt ein an zwei Enden fixiertes Material genau in der Mitte durchschlägt. Aus der Einstellung des Pendels vor dem Versuch und dem endgültigen Ausschlag läßt sich die geleistete Arbeit berechnen. Die einzelnen Einstellungen des Pendels sind mit Ziffern bezeichnet, die bestimmte Hubhöhen bedeuten. Die zugehörigen Werte der Schlagenergien wurden der Eichkurve des Pendelschlagwerkes entnommen.

Zur Erklärung der Apparatur dient folgende Skizze.



Die Nachteile des Apparates lagen erstens in der Fixiervorrichtung, die nur gestattete Knochen von bestimmter Länge und Dicke zu verwenden, und weiter darin, daß beim Durchschlagen zu der Bruchwärme zweifellos noch eine gewisse Reibungswärme und Wärme durch den Druck der Schneide hinzukam. Der Vorteil war, daß die Bruchstelle vorher genau bestimmt und das Meßgerät an der betreffenden Stelle angebracht werden konnte.

Zur Bestimmung der Temperatur dienten Thermoelemente, die von mir durch Hartlötung aus 0,2 mm Konstantan- und Kupferdraht selbst angefertigt und geeicht wurden.

Die Ablesung geschah mittels eines Schleifengalvanometers der Firma C. Zeiß, das aus einem in Schleifenform zwischen den Polen von zwei Permanentmagneten aufgehängtem Draht besteht. Die beiden Magneten stehen einander gegenüber, so daß bei Stromdurchgang durch die Schleife ihre beiden Schenkel nach der gleichen Seite abgelenkt werden. Die Ausschläge der Schleife werden mit einem Mikroskop beobachtet, in dessen Gesichtsfeld eine 100-teilige Skala angeordnet ist. Die Vorteile dieses Instrumentes sind Unempfindlichkeit gegen schwache Erschütterung, aperiodische und schnelle Einstellung (Bruch-

teile von Sekunden) und Proportionalität der Ausschläge zur Stromstärke.

Die zur Verwendung kommenden Knochen waren fast ausschließlich Tierknochen vom Schlächter aus frischem zum Verkauf kommenden Fleisch ausgelöst, und im allgemeinen eine Stunde danach bearbeitet.

Durch die schon vorher geschilderte Begrenzung der Größe durch die Einspannvorrichtung standen folgende Knochen zur Verfügung: Fußknochen von Hammel, Kalb und Schwein, sowie Rinderrippen, d. h. also in der Hauptsache Röhrenknochen, deren Bruch niemals ganz eindeutig ist.

Da die Hammelknochen in der Größe am besten allen Forderungen entsprachen, wurden damit die meisten Versuche ausgeführt.

Zunächst wurden die Knochen von noch anhaftendem Fleisch und Sehnen entblößt, im allgemeinen unter Schonung des Periosts. In einigen Fällen wurde auch dieses mit entfernt. Dann wurde der Knochen in die Einspannvorrichtung eingepaßt und die spätere Bruchstelle markiert.

Schon jetzt soll erwähnt werden, daß die Bruchlinie nicht in allen Fällen durch die Marke ging, sondern manchmal erheblich davon entfernt verlief. So kam es, daß der Abstand des Meßgerätes von der Bruchstelle nicht konstant war, obwohl seine Entfernung von der Marke vor dem Versuch 1 mm im allgemeinen nicht überschritt.

Mit einem Drillbohrer von ca. 0,6 mm ⌀ wurde dann neben der Marke ein feines Loch gebohrt, das z. T. bis ins Mark, in der Mehrzahl der Fälle aber nur bis in die Corticalis bzw. in die Spongiosa reichte. Letzteres war wegen der geringen Stärke der Knochenwand nicht immer zu erreichen, obwohl es aus schon früher erwähnten Gründen am wünschenswertesten war.

In diesem Bohrkanal lag das Thermoelement mit etwas Wachs festgehalten. Um den Einfluß der anderen, sogenannten kalten Lötstelle auszuschalten, wurde sie in eine Thermosflasche mit Wasser von konstanter Temperatur gestellt.

In einzelnen Fällen lag das Element unter dem Periost unmittelbar dem Knochen auf.

Die Kupferdrähte des Thermoelementes wurden nicht frei an das Galvanometer herangeführt, sondern auf einem Hartgummibrettchen isoliert befestigt, um den Apparat vor der beim Durchschlagen zwangsläufig auftretenden Erschütterungen zu sichern.

Das Einspannen der Knochen gelang infolge der Größenunterschiede nicht immer in gleicher Weise. War die Dicke gleich der Höhe der Oeffnung, so lagen die Knochen von selbst fest, häufig mußten sie durch Holzklötzchen festgeklemmt werden, in vielen Fällen waren sie auch nur lose hineingelegt. Bei den stärkeren Kalbs- und Schweineknochen war es fast regelmäßig notwendig, die verdickten Epiphysenenden zurecht zu sägen.

Die Ergebnisse einschließlich der Veränderungen an den Knochen betreffend Art des Bruches, Entfernung vom Element usw. sind in den folgenden Tabellen zusammengestellt.

Hubhöhe I.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Knoch.
0,2	0,55	5		schräg	mitteldick
0,35	0,5	1	im Mark	„	dick
0.35	0,8	6	„	quer	„
0,3	0,4	0		„	mitteldick
0,55	0,65	1		quer mit Ausbruch	„
0,7	1,25	1		„	ziemlich dick
1,35	0,5	2		schräg	mitteldick
0,55	0,5	1		„	dick
0,2	0,3	0	„	quer mit Ausbruch	dünn, klein
0,55	0,55	1	„	schräg gesplittert	dick
1,65	0,45	0		quer	sehr dünn
0,4	0,5	1	„	schräg	älter m. d.
0,4	0,8	6		quer	„
0,2	0,3	2		schräg mit Ausbruch	frisch m. d.

Element herausgeflogen

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Knoch.
3,4	0,3	3		quer	
1,9	0,3	3		quer mit Ausbruch	
0,4	0,55	2		schräg	
1,3	0,9	0		quer	
0,2	0,3	2		schräg mit Ausbruch	
1,8	0.9	5		quer mit Ausbruch	
6,7	0,6	10		schräg	
—	0,6	0		quer	
—	0,2	1		„	
1,15	1,0	0		gesplittert	
1,7	0,6	0		quer mit Ausbruch	dünn
—	0,9	?		gesplittert	
1,65	0,6	0	im Mark	quer mit Ausbruch	dünn, älter

T = Temperatur. K = Bruch — Arbeit in mkg. E = Entfernung des Bohrkanals von der Bruchfläche. B = Tiefenlage des Bohrkanals.

Hubhöhe II.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
2,4	0,2	0—1		schräg	
0,6	0,3	4		„	trocken
2,1	0,4	4	im Mark	„	„
0,7	0,4	3		quer	
0,6	?	6		schräg gesplittert	
1,1	?	3		quer	
0,5	0,9	0—1		quer mit Ausbruch	nicht ganz frisch dick
1,15	0,8	0—1		quer	„
0,8	0,8	3	„	quer mit Ausbruch	„
0,4	0,85	6	„	„	
0,4	0,6	5	„	„	
0,2	0,35	10		schräg, 2 Längsfiss.	
0,55	1.0	0		quer	4 Tage alt
0,4	0,35	0		schräg	„
0,7	0,4	0		„	„
0,2	0,4	3		quer mit Ausbruch	frisch

Element herausgeflogen.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art a. Kn.
1,0	0,2	4		quer	
1,7	0,4	0		„	
0,6	0,6	0		„	
0,4	0.4	2		„	
2,1	0,8	0		„	
1,0	0,6	0		„	nicht ganz frisch, dick
1,3	0,7	0	im Mark	quer Ausbruch	„
2,8	0,8	0	„	„	nicht ganz frisch
0,85	0,85	4		gesplittert	4 Tage
0,3	0,7	2	„	schräg	„
0,2	0,35	0		„	„
1,15	0,7	0		quer	„
4,1	0,5	0		nur Kerbe nicht gebrochen	nicht ganz frisch, dick

Hubhöhe III.

1,1	0,4	2		quer mit Ausbruch	
0,9	0,5	2		schräg	
0,4	0,35	0		fast quer schräg	
0,8	0,4	0		quer	dick
1,0	?	3		quer mit Ausbruch	schlank, dünn
0,4	?	0		schräg	10 Tage alt
1,0	0,4	8		quer	
0,2	0,3	8	im Mark	schräg mit Ausbruch	
1,35	0,45	0		schräg	
0,6	?	0		quer mit Ausbruch	
7,0	0,9	0		„	frisch

Element herausgeflogen.

1,2	0,7	5		quer mit Ausbruch	
0,6	0,5	10		quer	
0,6	0,4	10		„	
0,2	0,3	3	im Mark	schräg mit Ausbruch	10 Tg. alt
0,8	0,4	2		schräg	2 Tg. alt
1,2	0,4	3		quer	
0,6	0,35	0		„	
1,35	0,4	0—2		schräg	
1,5	0,4	0		quer	
0,8	0,7	0		„	

Hubhöhe IV.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
1,1	?	5		schräg mit Ausbruch	
0,8	0,7	0	im Mark	quer mit Ausbruch	dünn
0,7	0,9	3	„	schräg gesplittert	„
1,0	0,75	0		m. Ausbr. kein Bruch	dünn, lang
0,2	0,65	3		schräg	dick, kurz
0,25	0,85	2	„	quer mit Ausbruch	frisch
2,15	0,9	10		quer	„
0,35	0,65	8		schräg	
0,75	0,7	4	„	schräg mit Ausbruch	mehrere Tage alt ausgeschält
0,2	0,9	0		quer	„
0,2	0,5	4	„	schräg	„

Element herausgeflogen.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
2,2	0,7	0	im Mark	quer mit Ausbruch	dick
0,4	0,7	0	„	„	„
0,4	0,65	0	„	quer	dünn, lang
1,0	1,0	0		quer mit Ausbruch	„
1,85	1,0	0		quer	

Hubhöhe V.

1,35	1,2	0		quer mit Ausbruch	
3,1	2,9	3		quer gesplittert	
1,9	0,7	?		quer	nicht ganz frisch, dick

Element herausgeflogen.

1,35	0,9	?		quer gesplittert	
0,2	0,5	0		schräg	

Hubhöhe VI.

0,4	2,3	8		quer	älter
0,4	1,7	0		quer mit Ausbruch	„
0,2	1,7	2		„	„

3,65	2,1	0	im Mark	quer	älter
0,2	1,7	0	„	„	„

Hubhöhe VII.

0,35	2,3	6	im Mark	quer mit Ausbruch	
0,7	2,9	4	„	„	
0,4	2,1	4	„	schräg	
0,2	2,2	0		quer	
0,3	2,2	0	an der Oberfläche	„	

0,35	2,1	6		schräg gesplittert	

Hubhöhe VIII.

0,2	1,1	0	im Mark	quer mit Ausbruch	
0,35	1,9	2		schräg	

0,2	1,15	2		quer mit Ausbruch	

Von 120 Versuchen mit Hammelknochen waren etwa 8 durch Fehler in der Versuchsanordnung von vornherein auszuschließen.

Die übrigbleibenden 112 mußten noch einmal in zwei Gruppen unterteilt werden. Bei der ersten Gruppe war die Versuchsanordnung vor und nach dem Versuch gleich, bei der zweiten trat insofern eine Veränderung ein, als das Thermoelement aus dem Bohrkanal herausgeflogen war und frei in der Luft hing.

Schon beim kurzen Ueberfliegen der Zahlen fällt auf, daß die Werte dieser zweiten Gruppe im allgemeinen höher liegen als die ersten.

Für die Fälle, in denen die Entfernung des Elementes von der Bruchstelle gleich 0 war, der Bruch also direkt durch den Bohrkanal ging, könnte man die höhere Temperatur dadurch erklären, daß tatsächlich an der Stelle der stärksten Beanspruchung gemessen wurde. Andererseits ist es wohl möglich, daß durch den Druck des Hammers und seine Reibung eine höhere Temperatur zu messen war, die natürlich aber nicht der eigentlichen Bruchtemperatur entspricht.

Um einmal festzustellen, welche Temperaturerhöhung die Reibung mit dem Hammer bewirkt, wurde das Thermoelement auf einem Holzklötzchen befestigt und dieses so eingespannt, daß das Pendel gerade an der Fläche mit dem Thermoelement vorbeistreichen mußte. Die Versuche ergaben Temperaturen von 1—2 Grad.

Zieht man von den höchsten gemessenen Werten diese Zusatztemperatur ab, so liegen sie wieder innerhalb der auch bei den anderen gefundenen Grenzen.

Ob die Reibung oder die günstige Lage des Thermoelementes für die höhere Temperatur maßgebend war, läßt sich schwer entscheiden, da nach Beendigung des Versuches jeder Hinweis, der für das eine oder andere spricht, fehlt.

Dagegen ist die Temperatursteigerung eines herausgeflogenen Elementes, dessen Bohrkanal einen größeren Abstand von der Bruchfläche hatte, nicht auf Reibung zurückzuführen, da auch bei liegengebliebenem Element in ähnlicher Entfernung häufig höhere Werte gefunden wurden.

Da die Kraft, die zum Bruch notwendig ist, wie schon mehrmals erwähnt wurde, für die Temperatur ohne Bedeutung ist, ist es unnötig hierüber einen Vergleich anstellen zu wollen. Die Werte wurden nur der Vollständigkeit halber in die Tabelle aufgenommen.

Es sollen nun zunächst die Resultate nach der Entfernung des Elementes von der Bruchstelle umgeordnet werden, und dabei von den Zahlen der rechten Spalte diejenigen mit einbezogen werden, die nicht erheblich von denen der linken abweichen.

Entfernung = 0 mm.

dick		dünn		mitteldick	
frisch	alt	frisch	alt	frisch	alt
0,8	2,4	**0,2**	1,65	0,3	0,4
2,2	0,5	**0,8**		0,4	0,7
0,4	1,15	1,0		1,35	0,4
	1,9	**0,4**		0,6	0,2
	2,1	1,0		1,35	0,55
	1,0	1,7		0,2	0,4
	[4,1]	1,65		0,3	0,2
				0,2	(1,15)
				(1,7)	0,6
				0,6	0,2
				1,3	[2,8]
				1,35	[3,65]
				1,5	
				0,8	
				(1,85)	
				1,3	
				1,15	
				1,35	
				0,2	
				[7,0]	

fettgedruckte Zahlen = Bohrkanal bis ins Mark.
eingeklammerte ( ) Zahlen = fragliche Werte bei herausgeflogenen Elementen.
eingeklammerte [ ] Zahlen = nicht berücksichtigte Werte.

Betrachtet man die Fälle, in denen das Bohrloch in der Bruchfläche lag, d. h. die Entfernung des Thermoelementes gleich 0 war, so ergeben sich Temperaturen von 0,2 bis 2,4 Grad. Dabei findet sich bei der Unterteilung in frische und ältere Knochen im allgemeinen kein Anhalt dafür, daß eine Herabsetzung der Temperatur bei Austrocknung stattfindet. Es scheint also, daß der Einfluß der spezifischen Wärme ausgleichend wirkt.

Ferner ist zu beachten, daß sich bei der Gruppe „dick“,

bei der nämlich das Verhältnis der Wandstärke zum Durchmesser groß war, die höchsten Werte bis 2,4 Grad und auch der größte Durchschnittswert mit 1,38 Grad ergaben. Dagegen fanden sich in der Spalte „dünn" gegenüber den mitteldicken Knochen verhältnismäßig hohe Zahlen und auch ein Durchschnittswert, der mit 1,05 über dem der mitteldicken Knochen von 0,74 bzw. 0,82 bei Einbeziehung der Werte 1,85 und 1,7 liegt. Bei den hohen Werten der Gruppe „dick" kann es sich sehr wohl auch um einen Materialunterschied gehandelt haben.

Unter den mitteldicken Knochen brach einer mit einer Temperatur von 7 Grad. Vermutlich ist die unmittelbar durch die Hammerschneide aufgetretene Zerstörung dabei maßgebend gewesen, wie aus den Kurven der später beschriebenen Druckversuche hervorgeht.

In derselben Gruppe ist, wenn man den Wert 1,5 unberücksichtigt läßt, ein Unterschied durch die Feuchtigkeit ersichtlich, indem bei den ausgetrockneten Knochen die Zahlen 0,7 Grad nicht übersteigen, während der Höchstwert der frischen Knochen im ungünstigsten Falle 1,35 Grad betrug.

Die Anbringung des Elementes in der Corticalis oder im Mark läßt in dieser Zusammenstellung keinen Unterschied erkennen.

Entfernung = 1 mm.

dick		mitteldick	
frisch	alt	frisch	alt
0,35		0,55	0,4
0,7			
0,55			
0,55			

Ueber die 6 Versuche der Entfernung 1 mm läßt sich in diesem Zusammenhang nichts aussagen. Die Werte weichen kaum von dem Mittelwert 0,51 ab, der niedriger liegt als der der Gruppe 0.

Für die Entfernung 2 mm kamen nur mitteldicke Knochen zur Verwendung. Der Höchstwert 1,35 und der Mittelwert 0,57 liegen etwas niedriger als bei Gruppe 0.

Entfernung = 2 mm.

mitteldick	
frisch	alt
1.35	0,3
0,2	0,8
0,4	1,35
0,2	0,2
0,4	
1.1	
0,9	
0,25	
0,35	
0,2	

Entfernung = 3 mm.

dick		dünn		mitteldick	
frisch	alt	frisch	alt	frisch	alt
0,2	0,8	1,0		3,1	0,2
		0,7		1,2	
				1,1	
				0,2	
				0,7	
				3,4	
				1,9	

Dagegen gibt die Entfernung 3 mm trotz fast gleicher Anzahl von Versuchen wieder höhere Zahlen. In der Spalte „mitteldick" ist der Höchstwert 3,4 Grad und übertrifft damit den der Gruppe 0 noch um 1 Grad. Der Durchschnitt liegt bei 1,47 Grad, wenn man die Temperatur des alten Knochens mit einbezieht, bei 1,66 Grad ohne diesen, also in beiden Fällen über dem der anderen Gruppen.

Entfernung = 4 mm.

mitteldick	
frisch	alt
1,0	0,6
0,7	0,85
0,4	2,1
	0,75
	0,2

Der Mittelwert bei der Entfernung 4 mm ist 0,82 Grad, der Höchstwert 2,1, entspricht also der Gruppe 0. Unter diesen Messungen sind verhältnismäßig viele, bei denen

der Bohrkanal bis in das Mark reichte. Zu diesen gehört der höchste Wert dieser Gruppe 2,1 Grad. Der Mittelwert dieser Messungen liegt bei 0,83 Grad, gleicht also dem der ganzen Gruppe. Auch hier ist ein Einfluß durch die Tiefenlage des Bohrloches nicht erkennbar.

E. = 5 mm		E. = 6 mm.			E. = 8 mm.	
mitteldick		dick		mitteldick	mitteldick	
frisch	alt	frisch	alt	frisch alt	frisch	alt
0,2		0,35		0,35 0,4	1,0	0,4
1,1				0,35	0,35	
1,2				0,35	0,2	
0,4				0,6		
[1,8]				0,4		

Gruppe 5—6—8 mm entsprechen etwa Gruppe 1 mit ihren verhältnismäßig niedrigen Werten und der geringen Anzahl der Versuche.

E. = 10 mm.	
mitteldick	
frisch	alt
0,2	
[6,7]	
2,15	
0,6	
0,6	

Für die Entfernung 10 mm gilt im allgemeinen das eben Gesagte. Es findet sich auch in dieser Gruppe ein Wert von 2,15 und 6,7 Grad, die aus dem Rahmen fallen, für die aber namentlich für den ersteren wirklich nur die Bruchtemperatur die Ursache sein kann. Welche Einflüsse dafür in Frage kommen können, wurde oben ja schon mehrmals erwähnt.

Stellt man nun die Messungen nach der Hubhöhe zusammen unter Berücksichtigung der vorher ausgewerteten Umgruppierungen, so ergeben sich für den mitteldicken frischen Knochen bei der Entfernung 0 bis 5 mm folgende Zahlen:

Hubhöhe 1 = 0,80 Grad
Hubhöhe 2 = 0,90 Grad
Hubhöhe 3 = 0,80 Grad
Hubhöhe 4 = 0,65 Grad
Hubhöhe 5 = 1,50 Grad
Hubhöhe 6 = 0,26 Grad
Hubhöhe 7 = 0,39 Grad
Hubhöhe 8 = 0,25 Grad

Daß bei der Hubhöhe 5 ein höherer Durchschnitt gefunden wurde, mag zum Teil daran liegen, daß hier die Enden der Knochen durch Holzklötzchen in der Einspannvorrichtung fest eingekeilt lagen.

Die elastischen Energien für einen beiderseitig eingespannten oder freien Stab sind gleich groß. Ist dagegen nur eine Seite eingespannt, die andere aber frei, dann ist die elastische Energie ungefähr 22 % kleiner. Danach darf man annehmen, daß auch die unelastischen Energien im letzten Falle kleiner sind. Bei den Versuchen ist meist die eine Hälfte des Knochens herausgeflogen, während die andere eingespannt blieb. Man muß daher annehmen, daß die Einspannung der beiden Enden im Gegensatz zu Gruppe 5 nicht gleich fest gewesen ist.

Die verhältnismäßig geringe Anzahl der Versuche in den einzelnen Gruppen mag die Erklärung für die übrigen Abweichungen geben, wengleich auch hier die Materialfrage nicht ohne Einfluß zu sein braucht.

Sicher ist, daß mit zunehmender Hubhöhe keine deutliche Erhöhung der Temperatur auftritt. Daraus geht klar hervor, daß der Druck des Hammers im Augenblick des Aufschlagens, der bei größerer Hubhöhe erheblich stärker sein müßte als bei geringerer, für die Temperatur beim Bruch als Faktor nicht in Frage kommt. Das ist insofern bedeutungsvoll, als die Art, einen Bruch herbeizuführen, wie es im Kerbschlagapparat geschieht, beim Lebenden nicht vorkommt, da selbst bei direkter Gewalteinwirkung eine Dämpfung durch Muskulatur, Fettpolster und Haut eintritt. Die Feststellung ist um so wichtiger als reine Biegungsversuche nicht gemacht werden konnten, da die zur Verfügung stehenden Apparate für die Versuche nicht recht geeignet waren.

Aber noch etwas anderes ist aus diesen Zahlen herauszulesen. Ueber die Ausbreitung der Wärme im Knochen habe ich keine Literatur finden können. Geht diese Ausbreitung schnell vor sich, so müßte bei einem langsam verlaufenden Bruch eine geringere Temperatur gemessen werden, da die durch die unelastische Arbeit über eine längere Zeit entstandene Wärme schon abgeflossen ist, ehe es zum Bruch kommt. Dagegen müßte bei einem sehr schnell er-

folgenden Bruch die Wärme, die während der kurzen Bruchzeit nach und nach entsteht, zu örtlicher Summation führen, so daß bei größerer Geschwindigkeit eher eine höhere Temperatur gemessen werden müßte. Da aus der Zusammenstellung eher das Gegenteil hervor geht, ist rückschließend anzunehmen, daß die Wärmeausbreitungsgeschwindigkeit bei den verschiedenen Bruchgeschwindigkeiten, die untersucht worden sind, ohne Einfluß war.

Zusammenfassung:

Die zur Beobachtung gekommenen einwandfreien Bruchtemperaturen lagen zwischen 0,2 und 3,4 Grad.

Bei der Entfernung des Thermoelementes von der Bruchfläche bis 4 mm einschließlich traten ungefähr die gleichen Werte auf, von 5 bis 10 mm lagen sie im allgemeinen etwas tiefer. Daß eine genauere Differenzierung innerhalb dieser Grenzen nicht möglich war, und daß z. B. die Werte der Gruppe 3 etwas aus dem Rahmen fielen, kann darauf zurückgeführt werden, daß die Bruchfläche eigentlich keine Fläche sondern ein Raum ist, d. h. der Knochen bricht zackig, so daß die genaue Entfernung des Elementes von der Durchschlagstelle in verschiedener Höhe nicht gleich ist. Gemessen wurde aber nur der Abstand an der Oberfläche. Außerdem spielt die Materialfrage eine Rolle, jedoch können hier nur Vermutungen ausgesprochen werden, da nicht jeder Knochen chemisch analysiert und auf seine Struktur untersucht werden konnte.

Die Austrocknung spielt eine nur untergeordnete Rolle. Die Tiefenlage des Thermoelementes scheint für die Höhe der Temperatur unwesentlich zu sein. Dabei muß allerdings die Einschränkung gemacht werden, daß die Lötstelle, die doch immer einige Millimeter lang ist, das Mittel aller auf ihrer Länge auftretenden Temperaturen angibt, so daß nicht gesagt werden kann, an welcher Stelle die von der Lötstelle angezeigte Temperatur vorgelegen hat.

Der im Augenblick des Aufschlagens wirksame Druck des Hammers trägt nicht zur Temperaturerhöhung bei, sondern diese entsteht allein aus der unelastischen Bucharbeit im Knochen selbst. Die Wärmeausbreitungsgeschwin-

digkeit war bei den verschiedenen Bruchgeschwindigkeiten der vorliegenden Versuchsreihe scheinbar ohne Einfluß.

In allen Gruppen wurden einige erheblich über dem Durchschnitt liegende Werte gefunden, für die keine Fehler in der Versuchsanordnung bzw. Ausführung verantwortlich zu machen waren.

Bei allen bisher beschriebenen Versuchen lag das Thermoelement beim Biegungsversuch auf der Druckseite, also auf der dem Hammer zugewandten Seite. Bringt man es dagegen auf der Zugseite d. h. auf der dem Hammer entgegengesetzten Seite an, so müssen, da der Elastizitätsmodul für Druck und Zug schon im elastischen Gebiet differiert, auch die Temperaturen verschieden sein. Durch die abweichende Größe des Elastizitätsmoduls verschiebt sich nämlich während des Bruches die neutrale Faserschicht nach der Seite der größeren Festigkeit, also nach der Druckseite hin, und die Wärmeentstehung erstreckt sich auf der Zugseite über ein ausgedehnteres Gebiet.

Für die Anbringung des Elementes oben und unten d. h. senkrecht zur Biegungsachse ist keine Temperaturerhöhung zu erwarten, da es sich in diesem Falle in der neutralen Zone befindet. Die wenigen Versuche, die mit derartig angebrachten Bohrkanälen gemacht wurden, bestätigen das eben Gesagte. Sie ergaben trotz einwandfreier Versuchsbedingungen keine Temperaturen.

Die übrigen Ergebnisse dieser Versuche gibt die folgende Tabelle wieder.

Versuche mit Hammelknochen.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.	H.
0,2		2	O ←		alter	
0,2		0	O ←		„	
0,2		0	O ←	schräg	frisch	2
—	0,4	0	O ←	quer	„	2
0,2	0,4	0	O ←	„	„	2
—	0,2	0	O ←	„	„	2

B = Lage des Bohrkanals. ← = Schlagrichtung.
H = Hubhöhe.

Von den 7 Versuchen mit Kalbsknochen der folgenden Tabelle ergaben zwei keine Temperaturen. Bei dem einen erfolgte der Bruch an der Einspannstelle, also etwa 6 cm von dem Thermoelement entfernt.

Hubhöhe 4.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
4,3		0		quer	1 Tag alt
				Längsfissur	mit Periost
9,0		0		quer	ohne Periost
2,6		0		schräg	mit Periost
1,5		0	Element unterm Periost	„	„
—				„	1 Tag alt
2,6			Element tangential	„	nicht ganz frisch mit angetrockneter Sehne
Hubhöhe 5					
—		60		schräg	1 Tag alt

Vergleicht man die Kalbsknochen mit den in den bisherigen Versuchen benutzten Hammelknochen, so sind erstere höchstwahrscheinlich leimhaltiger, also weicher. Außerdem ist das Verhältnis des Innenradius zum Außenradius bei den beiden Knochenarten nicht das gleiche, sondern beim Kalb größer, und zwar:

Kalb 0,65 — Hammel 0,44.

Es folgt daraus, daß die zu erwartenden Temperaturen höher sein müssen als die bisher gemessenen. Wie schon an anderer Stelle erwähnt wurde, mußten die Kalbsfüße zurecht gesägt werden, um in die Apparatur eingepaßt werden zu können. Sie lagen daher im Gegensatz zu den Hammelknochen stets fest eingeklemmt.

Die Versuche ergaben, wie obige Zusammenstellung zeigt, Temperaturen von 1,5 bis 9 Grad, alle in der geringsten Entfernung von der Bruchstelle gemessen. Aus den Zahlen geht hervor, daß die Querbrüche eine höhere Temperatur aufweisen als die Schrägbrüche . Die Erklärung liegt in der größeren Konzentration der Energie beim Querbruch.

Versuche mit Schweineknochen.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.	H.
0,9	0,9	?	im Mark	schräg mit Ausbruch	frisch mit Mark	3
2,0	2,0	0	„	schräg gesplittert	„	5
1,05	3,3	1	„	schräg	„	5
6,5	1,1	3—4	„	gesplittert	frisch ohne Mark	2
3,6	0,8	0	„	schräg	frisch mit Mark	2

Nur der Vollständigkeit halber sollen hier noch die 5 Versuche mit Schweineknochen erwähnt werden. Da diese eine geringe Wandstärke haben, traten meist Splitterbrüche auf, die auch durch den Bohrkanal gingen, so daß das Thermoelement aus seinem Lager herausgerissen wurde. Trotz der kleineren Wandstärke war das Verhältnis Innenradius zu Außenradius doch niedriger als bei den Kalbsknochen. Wenn also die gefundenen Werte bei sonst gleichen Versuchsbedingungen etwas kleiner sind als die der Kalbsknochen, so kann man daraus auf eine ähnliche Struktur beider Knochenarten schließen.

Versuche mit Rinderrippen.

Hubhöhe III

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
0,85	0,9	0		quer	Lötstelle auf der Fläche
1,75	1,9	0—2	im Mark	„	„

Hubhöhe IV.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
1,4	3,9	3		quer mit Ausbruch	„

Hubhöhe V.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
0.55	?	0		schräg gesplittert	hochkant Lötstelle auf d. Kante

Element herausgeflogen.

T.	K.	E.	B.	Art d. Br.	Art d. Kn.
2,2		0		quer und längs	Lötstelle auf der Fläche
2,7		0		quer	„
2,95		0		flach schräg	Lötstelle auf der Kante

Die Versuche mit Rinderrippen lassen sich aus mehr-

fachen Gründen mit den vorherigen schwer vergleichen. Während die bisherigen Messungen ausschließlich an Röhrenknochen gemacht wurden, haben wir es jetzt mit sogenannten platten Knochen zu tun. Die Schäfte der Röhrenknochen haben eine gut ausgebildete Compacta, eine nur gering entwickelte Spongiosa und einen weiten Markraum, während das Mark der Rippen innerhalb der stark ausgebildeten Spongiosabälkchen liegt, die auf beiden Seiten von einer verhältnismäßig dünnen Rindenschicht bedeckt sind. Der Querschnitt ist beim Röhrenknochen rund bzw. oval, bei den Rippen dreieckig. Dazu kommt, daß die Rippen in zwei Ebenen gebogen sind, ein Biegungsversuch also in den einzelnen Ebenen verschieden verlaufen muß. Während die Form des Querschnittes nach dem früher Gesagten für die zu erwartende Temperatur unwesentlich ist, scheint der Einfluß der Struktur und Zähigkeit sich ausgeglichen zu haben.

Als Ergänzung der Kerbschlagversuche wurden Druckversuche ausgeführt. Bei den Versuchen wurden nur zum Teil Röhrenknochen verwendet, da die Anbringung des Thermoelementes bei diesen insofern auf Schwierigkeiten stieß, als die Bruchstelle vorher nicht bekannt ist. Es wurden deshalb außerdem die dicken Epiphysenenden gewählt, in die durch einen langen Bohrkanal die Lötstelle hineingeführt wurde. Die Proben wurden solange zusammengequetscht, bis sie vollkommen deformiert waren. Der Unterschied in diesen Versuchen gegenüber den Kerbschlagproben liegt nicht nur in der Art und Form des Materials, sondern auch in der Beanspruchung, da ein eigentlicher Bruch nicht zustande kommt.,

Die Messungen an Röhrenknochen wurden derart ausgeführt, daß aus der Diaphyse ein Ring herausgesägt wurde und in der Längsachse des Knochens belastet also gestaucht wurde. In den Fällen, in denen keine Temperatur auftrat, lag die Lötstelle über 1 cm von der Bruchlinie entfernt.

Die gefundenen Werte liegen wie die folgende Zusammenstellung zeigt, innerhalb derselben Grenzen wie die der Kerbschlagversuche, und die Druckversuche sind somit nicht nur eine Ergänzung sondern wertvolle Bestätigung der bisherigen Messungen. Da der Vorgang des Brechens

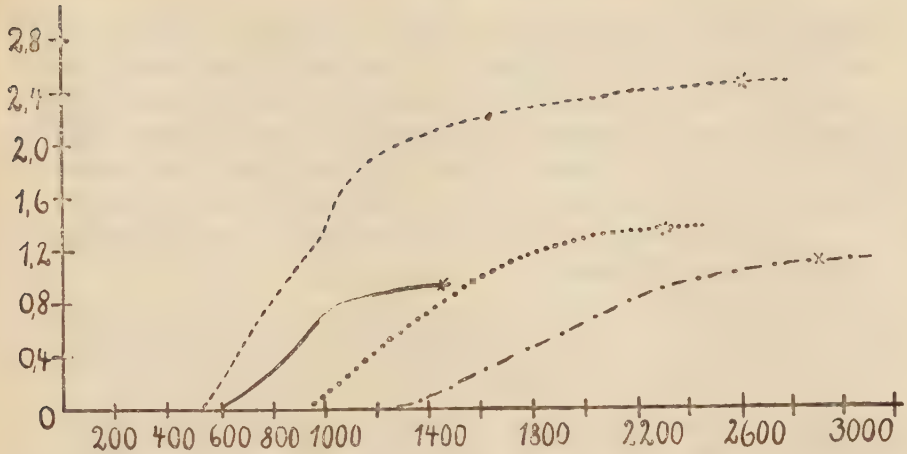
sich bei diesen Versuchen auf eine längere Zeit erstreckte, war Gelegenheit, den Verlauf der Temperatursteigerung bei den verschiedenen Belastungen zu beobachten und kurvenmäßig festzulegen.

Druckversuche mit Schweineknochen.

Diaphysen				Epiphyse.			
T.	Bt_1	D.	Bemerkungen	T.	Bt_1	D.	Bemerkungen
0,1	—	➢	—	1,45	—	➘	—
0,4	—	➘	—	1,2	800	➘	—
0,85	1100	➘	Element lag 8 mm von der Bruchlinie entfernt	1,7	700	➢	—
				1,45	800	➘	—
0,3	1400	➘	Element lag sehr weit v. der Bruchlinie entfernt	1,65	1000	➘	siehe Kurve
2,2	—	➘	Höhe = Breite d. Ringes	1,65	1300	➘	siehe Kurve
0,4	—	➘	Nach d. ersten Knacken noch keine Temp. —	2,2	800	➢	Bei 1" trotz weiterer Belastung zunächst keine Steigerung, dann plötzliches Anschnellen
1,4	—	➘	Höhe = 2mal Breite d. Ringes				
0,7	~300	➢	bei 300 kg Belastg. 0,1 °				
				2,7	400	➘	siehe Kurve
0,95	—	➘	Höhe = Breite d. Ringes	2.0	500	➢	—
0,95	—	➘	Höhe = Breite d. Ringes Radiäre Sprünge	1,65	—	➘	—
2,05	—	➘	Höhe = Breite d. Ringes Umrollung u. Einrisse	1,1	—	➘	siehe Kurve
2,05	—	➘	Breite > Höhe d. Ringes 250 kg = 0,95°, 1000 kg = 1,5°				

6 unbrauchbare Versuche. 4 Versuche nicht brauchbar.
Bt_1 = Belastung in kg bei Beginn des Temperaturanstieges. D = Druckrichtg.

Die Belastung konnte fast in allen Fällen über 3000 kg gesteigert werden, doch war leider keine Ablesung mehr möglich, da die Meßvorrichtung der Maschine nur bis 3000 kg reicht.



Der Verlauf der Kurven zeigt, daß im elastischen Gebiet keine Temperatur auftrat. Dann beginnt ein verhältnismäßig gleichmäßiges Steigen der Temperatur und bei einer bestimmten Belastung ein plötzliches Abfallen. Man kann daraus schließen, daß der flachere mit der Belastung proportional verlaufende Temperaturanstieg einem Gebiete gleichartiger plastischer Aenderung entspricht, während die plötzlich stark abfallende Temperatur das Zeichen für erhebliche innere Zerstörung des Knochens darstellt. Es ist interessant, daß bei 3 von den 4 Versuchen der Uebergang bei annähernd der gleichen Temperatur liegt. Das Mittel dieser drei entspricht dem Mittel, das bei den Biegungsversuchen beobachtet wurde. Da bei den Druckversuchen eine Reibung wie beim Kerbschlaghammer auszuschließen ist, so ist für die Kerbschlagversuche zu folgern, daß die gemessenen Werte der wahren Bruchtemperatur entsprechen.

Der Einfluß der Austrocknung, die das Knochenmaterial spröder macht, ging aus der bisherigen Versuchsreihe nicht klar hervor. Die Knochen besitzen diese Eigenschaft im höchsten Maße, wenn sie maceriert und entfettet sind. Zu Versuchen stellte mir Herr Geheimrat Fick aus seinem Institut derart präparierte menschliche Knochen zur Verfügung. Es wurden untersucht: Radius, Ulna und Fibula.

Diese Knochen splitterten bereits bei geringster Belastung. Eine Temperaturerhöhung an der Bruchfläche

konnte nicht nachgewiesen werden. Dagegen gaben die noch nicht entfetteten Knochen durchschnittlich eine Erwärmung von 0,2 bis 0,4 Grad. Nur ein Radius und eine Fibula brachen bei einer Temperatur von 1,15 Grad. Dabei ist nur bemerkenswert, daß der Radius erst bei einer höheren Belastung brach als die übrigen Knochen.

Die Zusammenstellung der Resultate dieser Versuche gibt folgende Tabelle:

Kerbschlagversuche mit nicht entfetteten macerierten menschlichen Knochen.

T.	K.	E.	B.	H.	Art d. Br.	Art d. Kn.	Bemerkungen
0,2	0,9	0		3	schräg mit Ausbruch	Ulna Facies post → Olecranon ↑	Beim Bruch Geräusch als ob Glas springt. Element herausgeflogen
0,2	0,65	5		2	schräg	Radius Laterale Kante → Capitulum ↓	Lötstelle herausgeflogen
0,4	0,2	2	im Mark	2	quer	Radius Volar-Fläche → Capitulum ↓	„
0,4	0,2	1		2	„	Radius Volar-Fläche → Capitulum ↓ Lötstelle neben crista interossea	„
1,15	1,2	3		1	„	Radius Capitulum ↑	„
0,2	0,4	6		1	schräg mit Ausbruch	Ulna Olecranon ↓ mediale Fläche →	„
0,3	?	3		1	quer mit Ausbruch	Ulna Olecranon ↑ laterale Fläche →	„
—	0,3	0		1	quer	Ulna Olecranon ↓ mediale Fläche →	„
—	0,7	8		1	quer mit Ausbruch	Ulna Olecranon ↓ laterale Fläche →	„
0,4	0,3	0		1	schräg gesplittert	Fibula	„
1,15	0,2	2	bis in d. gegenüberlg. Cortic.	1	quer	„	Lötstelle herausgeflogen oben Entfernung von der Bruchlinie 2 mm unten 0
—	0,2	0		1	„	„	Lötstelle herausgeflogen
—	0,7	2		1	schräg gesplittert	Ulna Olecranon ↓ mediale Fläche →	„

Es scheint demnach die Austrocknung und Befreiung von organischer Substanz im Sinne einer geringeren Erwärmung der Bruchflächen zu wirken, allerdings erst dann, wenn sie stärkere Grade erreicht haben, wie es dem Verhalten spröden Materials entspricht.

Welche Schlußfolgerungen dürfen nun aus den gesamten Ergebnissen gezogen werden?

Der Mittelwert beim Bruch der Hammelknochen betrug etwa 0,8 bis 0,9 Grad, bei den Kalbsknochen 2,7 Grad, bei den Schweineknochen 1,9 Grad.

Das spezifische Gewicht gereinigter Knochensubstanz ist nach Abey für den Menschen 1,936, für das Rind 2,064, nach Rauber für den Menschen 1,825—1,901, für das Kalb 1,889, für das Rind 2,024, für das Schwein 1,965.

Das Verhältnis des Innen- zum Außenradius ist beim Hammel sehr niedrig etwa 0,36, beim Schwein 0,62 und beim Kalb 0,65.

Die gleichen Werte beim Menschen an verschiedenen Stellen gemessen ergeben für den Radius 0,4—0,6, für die Ulna 0,35—0,52 und für den Humerus 0,51—0,66.

Bezüglich des spezifischen Gewichtes stehen die menschlichen Knochen also den Kalbsknochen am nächsten. In der Form entsprechen mit Ausnahme des oberen Radius- und unteren Ulnateiles alle hier angegebenen am ehesten dem Kalb.

Ein Vergleich über den Aufbau tierischer und menschlicher Knochen ist mir nicht bekannt, doch möchte ich auch hier eher eine Aehnlichkeit mit den Kalbs- und Schweineknochen annehmen.

Die geringfügige Austrocknung, die bei den mir zur Verfügung stehenden frischen Tierknochen vorhanden war, ist als belanglos anzusehen.

Demnach dürfte es erlaubt sein, die beim Bruch eines menschlichen Knochens auftretende Temperatur im Mittel auf 2,2 Grad zu Schätzen. Wenn schon diese Temperaturerhöhung schädlich sein würde, dürfte kein Knochenbruch heilen. Wie aus der Betrachtung im Anfang der Arbeit hervorgeht, kann sie auch noch keine Veränderung hervorrufen.

Eine Stelle eines Knochens mit geringer Wandstärke bei besonderer Zähigkeit der Substanz müßte aber eine erheblich höhere Temperatur ergeben, besonders, wenn außerdem alle in dieser Richtung wirkenden Momente, wie glatter Bruch, spezifisches Gewicht, spezifische Wärme usw. die Temperaturerhöhung begünstigen.

Wenn bei den macerierten menschlichen Knochen einige darunter waren, deren Temperatur das 4-fache des Mittelwertes betrug, so würden auf den normalen geschätzten Mittelwert bezogen schon ungefähr 8 Grad im Bereich der Wahrscheinlichkeit liegen. Unterstützt wird diese Annahme dadurch, daß unter den beschriebenen Versuchen Einzelfälle mit Temperaturen bis 9 Grad gefunden wurden.

Eine Nekrose des Knochens, wie sie bei einer Temperaturerhöhung über 12 Grad eintritt, ist allerdings nicht anzunehmen. Dagegen ist eine Schädigung der Funktion der Zellen durch Temperaturen über 6 Grad durchaus wahrscheinlich.

Es ist also möglich, daß unter besonderen Umständen die Temperaturerhöhung beim Knochenbruch als Teilfaktor für das Zustandekommen einer Pseudarthrose mitwirkt.

Es sei mir gestattet, an dieser Stelle Herrn Professor Dr. Georg Magnus meinen Dank für die Stellung des Themas, sowie den Herren Professoren Dr. Holzlöhner Physiologisches Institut der Universität Berlin, Prof .Dr. Kucharski, Technische Hochschule zu Charlottenburg und Geheimrat Prof. Dr. Fick, Anatomische Anstalt der Universität Berlin für die tatkräftige Förderung beim Zustandekommen der vorliegenden Arbeit auszusprechen.

Literatur.

Abey: Ueber die verschiedene Widerstandsfähigkeit des Knochens im toten und lebenden Zustand. (Arch. f. Anat. Phys. u. wissenschaftl. Medizin Du Bois Reymond 1874).

— Vergleichende Untersuchungen der Knochen (Med. Centralblatt 1872).

Aschoff, Ludwig: Pathologische Anatomie.

Block: Ueber das Verhalten des Knochens nach Bohren und Nageln bei Drahtextension. (Arch. f. klin. Chir. 1925).

Bonome: Zur Histogenese der Knochenregeneration (Arch. f. pathol. Anat. u. Phys. v. R. Virchow 100 1885).

Falk: Zur Frage der Widerstandsfähigkeit der Gewebe vor und nach dem Tode. (Vierteljahresschrift f. gerichtl. Medizin 1873).

Fremy: Rauber-Kopsch Lehrbuch der Anatomie.

Hütte: Ingenieurs-Taschenbuch.

Jensen: Untersuchungen über die Wärmeempfindlichkeit überlebender Tumorzellen.

Kieling: Röntgenologische Studien über den Knochenabbau bei Frakturheilung (Arch. f. Orthop. u. Unfall Chirurg. 25 1927).

König: Ueber Abbau am gebrochenen Knochen, sein Wesen und seine Bedeutung. (Arch. f. klin. Chirurg. 146, 1927).

Magnus: Weitere Versuche über Verbrennungen durch das Geschoß (Med. Klinik 1918).

Nußbaum: Ueber Einwirkung von Hitze auf lange Röhrenknochen und Sterilisierung maligner Geschwülste (Bruns Beiträge zur klin. Chir. 129, 1923).

Rauber: Elastizität und Festigkeit der Knochen. Leipzig 1876.

Rauber-Kopsch: Lehrbuch der Anatomie.

Siebert: Der Effekt von abgestufter Wärmeeinwirkung auf Knorpel bei Homöo- und Heterotransplantation.

Tage, Kemp, Jens, Juul: Influence de la chaleur sur la division cellulaire dans un tissu cultivé in vitro.

Triepel: Stoßfestigkeit der Knochen. (Arch. f. Anat. u. Entwickl. von Dr. W. His 1900).

Vierordt: Daten und Tabellen.

Zuppinger: Warum bricht der lebende Knochen leichter als der tote? (Anatomische Hefte 23, 71—73.

Lebenslauf.

Verfasserin dieser Arbeit Eva Marie Luise Ulrici wurde am 11. November 1909 als Tochter des Dipl.-Ing. Hermann Ulrici und seiner Ehefrau Rosa geb. Freymuth in Kiel geboren.

Sie besuchte die Apelsche Privatschule in Charlottenburg, das Lyceum in Kiel, die Luisen-Schule in Göttingen, die Königin Luise Schule und Fürstin Bismarck Schule in Charlottenburg und legte Ostern 1929 die Reifeprüfung auf dem Hermsdorfer Realgymnasium ab.

Die Verfasserin studierte 11 Semester an der Universität Berlin und bestand am 30. Juli 1931 die ärztliche Vorprüfung und am 8. Februar 1935 die ärztliche Staatsprüfung.

Während ihrer Studienzeit besuchte sie die Vorlesungen, Kliniken und Kurse folgender Herren Professoren und Dozenten: Behrend, v. Bergmann, Bier, Bonnhöffer, Czerny, v. Eicken, Fick, Friebös, Frommolt, Gocht, Gohrband, Hahn, Hesse, Heubner, Heymann, Holzlöhner, Kauffmann, G. Klemperer, F. Klemperer, Kniep, Kopsch, Krause, Krückmann, Levinsohn, Müller-Hess, Nissen, Nernst, Petow, Rostock, Rössle, Rütz, Sauerbruch, Schlenk, Schürmann, Schütz, Stahl, Steudel, Stoeckel, Stumpf, Thiel, Trendlenburg, Wagner, Wehnelt, Weissenberg.

Allen diesen Herren, ihren hochverdienten Lehrern, spricht die Verfasserin ihren aufrichtigen Dank aus.